



Experimental analysis of the effect of using aluminum oxide nanofluid in improving the heat transfer of XU7 engine radiator

Bahman Rahmatinejad^{1*}, Hossein Rahimi Asiabaraki¹, Farzin Azimpour Shishevan¹,
Mohammad Ali Mohtadi Bonab²

¹ Department of Mechanical Engineering, Technical and Vocational University (TVU), Tehran, Iran

² Department of Mechanical Engineering, University of Bonab, Bonab, Iran

ARTICLE INFO

Keywords:

Al₂O₃
Nanoparticles
Nanofluid
Heat Transfer Coefficient
XU7 Engine

ABSTRACT

In this research, an experimental analysis of the effect of using aluminum oxide nanofluid (Al₂O₃) in improving the heat transfer of the engine radiator (XU7) with complete cooling system equipment was done. Tests in three pure water conditions; water and ethylene glycol (60:40) and finally with aluminum oxide nanofluid (Al₂O₃) with volume fractions of 1% and 2% and flow rates of 10, 21, and 32 liters per minute, in two slow and fast cycles. The cooling fan is done. The results showed that increasing the volume fraction of nanoparticles to the base fluid increases the heat transfer coefficient up to a flow rate of 21 liters per minute, and after that this coefficient decreases. By adding 2 percent by volume of nanoparticles to the base fluid at high fan speed, for flow rates of 10, 21, and 32 Lit/min, respectively, we see an approximate increase of 3%, 20%, and 16% in the displacement heat transfer coefficient compared to the base fluid. The pressure drop of the radiator with a volume fraction of 1 and 2% compared to the base fluid at a constant flow rate of 30 liters per minute was calculated as 22% and 40.8%, respectively.



© 2023 Iranian Society of Engine, Tehran, Iran. This article is an open-access article distributed under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution Noncommercial 4.0 International (CC BY-NC 4.0 license). (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/>).

* Corresponding author

E-mail address: b_rahmati60@yahoo.com (B. Rahmatinejad)

Received 15 September 2023; Accepted 15 December 2023

E-ISSN: 2345-4121/ISSN: 1735-5214

Cite this article: Rahmatinejad B, Rahimi Asiabaraki H, Azimpour Shishevan F, Mohtadi Bonab MA. Experimental analysis of the effect of using aluminum oxide nanofluid in improving the heat transfer of XU7 engine radiator. The Journal of Engine Research. 2023 June 22;70(2):66-79. doi: [10.22034/ER.2023.2011671.1015](https://doi.org/10.22034/ER.2023.2011671.1015)

تحلیل تجربی اثر استفاده از نانوسیال اکسید آلومینیوم در بهبود انتقال گرمای مبدل موتور XU7

بهمن رحمتی نژاد^{۱*}، حسین رحیمی آسیابارکی^۱، فرزین عظیم پور شیشوان^۱، محمد علی مهتدی بناب^۳

^۱ گروه مهندسی مکانیک، دانشگاه فنی و حرفه‌ای، تهران، ایران

^۲ گروه مهندسی مکانیک، دانشگاه بناب، بناب، ایران

اطلاعات مقاله	چکیده
کلیدواژه‌ها: نانوسیال اکسید آلومینیوم (Al_2O_3) نانوذرات نانوسیال ضریب انتقال حرارت موتور XU7	در این تحقیق تحلیل تجربی اثر استفاده از نانوسیال اکسید آلومینیوم (Al_2O_3) در بهبود انتقال گرمای مبدل گرمایی موتور XU7 با تجهیزات کامل سامانه خنک‌کاری انجام گرفت. آزمون‌ها در سه حالت آب خالص؛ آب و اتیلن گلیکول (۶۰:۴۰) و در نهایت با نانوسیال اکسید آلومینیوم با کسرهای حجمی ۱٪ و ۲٪ و شارهای ۱۰، ۲۱ و ۳۲ لیتر بر دقیقه، در دو دور کند و تند فن خنک‌کننده انجام شد. نتایج بررسی‌ها نشان داد ازدیاد کسر حجمی نانوذرات به سیال پایه سبب افزایش ضریب انتقال حرارت همرفتی تا شار ۲۱ لیتر بر دقیقه شده و بعدازآن این ضریب کاهش می‌یابد. با اضافه کردن ۲٪ حجمی نانوذرات به سیال پایه در دور تند فن خنک‌کننده به ترتیب برای شارهای ۱۰، ۲۱ و ۳۲ لیتر بر دقیقه، شاهد افزایش تقریبی ۳٪، ۲۰٪ و ۱۶٪ ضریب انتقال حرارت همرفتی نسبت به سیال پایه هستیم. افت فشار در مبدل با کسر حجمی ۱٪ و ۲٪ نسبت به سیال پایه در شار ثابت ۳۰ لیتر بر دقیقه به ترتیب ۲۲٪ و ۴۰٫۸٪ محاسبه شد.



© 2023 Iranian Society of Engine, Tehran, Iran. This article is an open-access article distributed under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution Noncommercial 4.0 International (CC BY-NC 4.0 license). (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/>).

* نویسنده مسئول

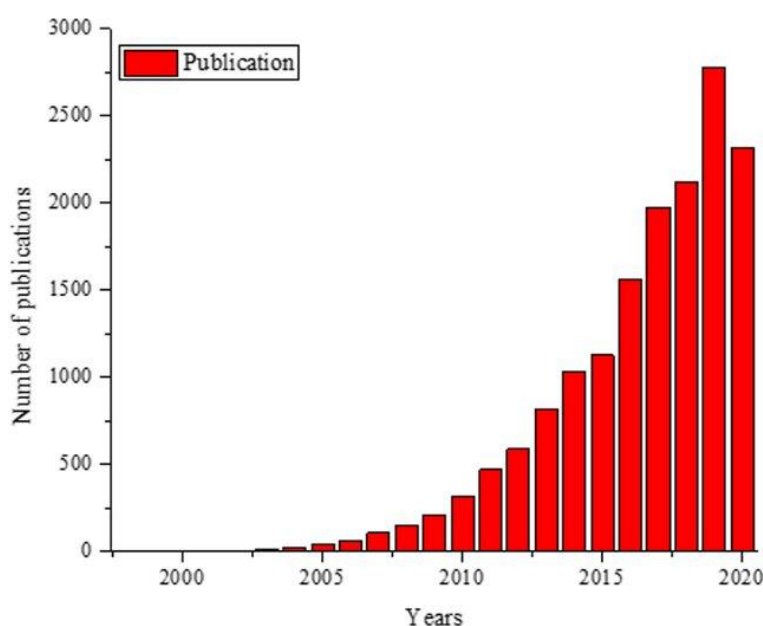
پست الکترونیکی: b_rahmati60@yahoo.com (بهمن رحمتی نژاد)

دریافت ۲۴ شهریور ۱۴۰۲؛ پذیرش ۲۴ آذر ۱۴۰۲

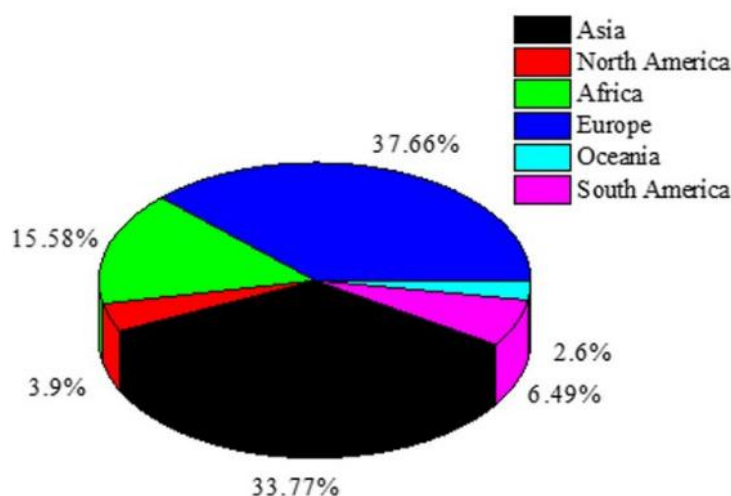
شاپای الکترونیکی: ۴۱۲۱-۲۳۴۵ / شاپای چاپی: ۵۲۱۴-۱۷۳۵

۱- مقدمه

یکی از مهم‌ترین راه‌های کاهش مصرف انرژی در صنایع مختلف افزایش راندمان حرارتی می‌باشد. به طوری که محدودیت انتقال گرمای سیالات منجر به اتلاف بخش زیادی از انرژی گردیده است. این هدایت حرارتی ضعیف باعث شده تا بهبود انتقال گرما سیالات عامل به عنوان روش جدید انتقال گرما پیشرفته مدنظر قرار گیرد. به طوری که ایده پراکنده‌سازی ذرات جامد در سیالات که با ذرات میلی و میکرومتری آغاز شده بود، با استفاده از نانوذرات جامد تکمیل شده و امروزه نانوسیالات جایگزین مناسبی برای سیالات معمولی از قبیل آب و روغن به شمار می‌روند. خصوصیات جالب نانوسیالات و ظرفیت زیاد آن‌ها برای افزایش انتقال گرما سبب شده که این گروه از سیالات در سال‌های اخیر مورد توجه محققان بسیاری قرار گیرند. شکل ۱ روند رشد مقالات منتشرشده بین‌المللی در خصوص نانوسیالات و شکل ۲ سهم قاره‌ای مشارکت کشورها در این تحقیقات را نمایش می‌دهد.

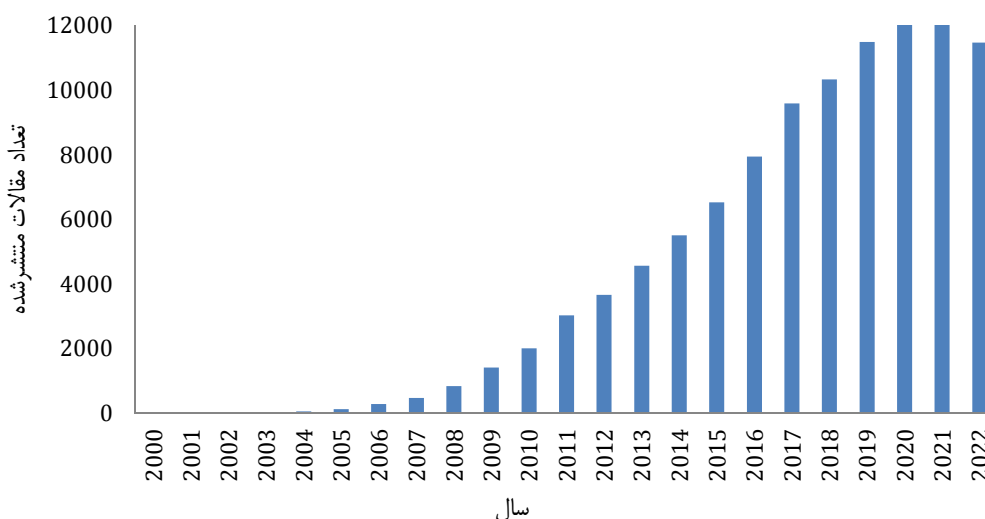


شکل ۱ نمودار رشد مقالات منتشرشده بین‌المللی بین سال‌های ۲۰۰۰ تا ۲۰۲۰ در خصوص نانوسیال [۱]



شکل ۲ سهم قاره‌ای از مشارکت کشورها در تحقیقات نانوسیال [۱]

آمارها نشان می‌دهد قاره اروپا سهم ۳۷٫۶۶ درصدی در تولید علم جهانی نانو را بر عهده دارد و بعد از آن قاره آسیا قرار دارد که دارای سهم ۳۳٫۷۷ درصدی است. در سال ۲۰۲۰ نزدیک به ۹ درصد از کل انتشارات علمی نمایه شده در Web of Science (WoS) مرتبط با فناوری نانو بود. چین، آمریکا، هند و ایران بیشترین سهم را در تولید علوم نانو در این سال داشتند. در این سال‌ها ایران جایگاه چهارم را در تولید دانش نانو در اختیار دارد. در شکل ۳ بر اساس اطلاعات پایگاه WoS آمار تولید مقالات ایران در خصوص نانوسیال بین سال‌های ۲۰۰۰ تا ۲۰۲۲ نشان داده شده است.



شکل ۳ آمار مقالات منتشر شده ایران در خصوص نانوسیال بر اساس اطلاعات پایگاه Web of Science (WoS)

محققین متعددی در زمینه بررسی استفاده از نانوسیالات در سامانه خنک‌کننده خودرو، تحقیق نموده‌اند؛ که در ادامه به تعدادی از آن‌ها اشاره می‌شود: ساریپلا^۱ و همکاران، در یک ارزیابی عددی با استفاده از نرم‌افزار اثر استفاده از نانوسیال CuO-آب-اتیلن گلیکول (۵۰:۵۰) با کسرهای حجمی ۲٪ و ۴٪ را در مبدل یک کامیون بررسی کردند. نتایج آن‌ها نشان داد عدد ناسلت ۴۰٪ و قدرت موتور ۵٪ افزایش یافته و سطح مبدل ۵٪ کاهش می‌یابد. در این حالت ۲٫۵ درصد مصرف سوخت خودرو کاهش پیدا کرد [۲]. رحمتی نژاد و همکاران به بررسی اثر نانوسیال Al_2O_3 در سامانه خنک‌کاری موتور M13NI پرداخته و نشان دادند اضافه نمودن کسر حجمی نانوذرات، سبب افزایش انتقال گرما و افزایش افت فشار و همچنین کاهش متغیر مریت می‌شود [۳]. کیانی و احمدی ندوشن در سال ۲۰۱۹ اثر نانوسیال آب-اکسید مس بر انتقال گرما مبدل خودروی پژو ۴۰۵ را به صورت عملی برای کسر حجمی ۰٫۵ و ۱ درصد انجام دادند. آن‌ها نشان دادند برای کسر حجمی نانوذرات ۰٫۵ و ۱ درصد در سیال پایه برای شار ۳۰ لیتر بر دقیقه، شدت انتقال گرما به ترتیب ۳ و ۶٫۹ درصد در مقایسه با سیال پایه افزایش می‌یابد [۴]. حاج عبداللهی و قمری در سال ۲۰۲۲ به بررسی عملی استفاده از نانوذرات Al_2O_3 و CuO برای بهبود عملکرد هیدرولیکی حرارتی مبدل پژو ۲۰۶ پرداخته و نشان دادند در هر دو مورد نانوسیال با اضافه کردن نانوذرات در درصد حجمی‌های مختلف و همچنین با تغییر دادن شار سیال و در نتیجه عدد ناسلت، عدد رینولدز و ضریب اصطکاک تغییر می‌کند [۵]. واجها^۲ و همکاران، به مطالعه عددی عملکرد انتقال گرمای نانوسیالات جریان آرام در یک لوله مسطح مبدل خودرو بدون در نظر گرفتن پره‌ها پرداختند. آن‌ها نشان دادند ضریب انتقال گرما نانوسیال نسبت به سیال پایه در عدد رینولدز ۱۰۰۰ با افزودن ۱٪ نانوذرات Al_2O_3 ، ۹۱٪ و با افزودن ۶٪ نانوذرات CuO، ۸۶٪ افزایش می‌یابد [۶]. ژی^۳

¹ Saripella

² Vajjha

³ Xie

و همکاران، افزایش انتقال گرما را به کمک نانوسیال اکسید آلومینیوم، اکسید قلع، اکسید تیتانیم و اکسید منیزیم با مخلوطی از آب و اتیلن گلیکول را گزارش دادند. نانوسیال‌های اکسید آلومینیوم، اکسید منیزیم و اکسید قلع، افزایش بالایی در انتقال حرارت در مقایسه با نانوسیال اکسید تیتانیم داشتند [۷]. لئونگ^۱ و همکاران در سال ۲۰۱۰ خصوصیات انتقال گرما و افت فشار مبدل خودرو را با استفاده از نانوذرات مس در اتیلن گلیکول به‌عنوان خنک‌کننده بررسی کردند. آن‌ها نتیجه گرفتند که شدت انتقال گرما با افزایش کسر حجمی نانوسیالات زیاد می‌شود. همچنین گزارش کردند حدود ۱۲،۱۳ درصد افزایش در توان پمپ در غلظت ۲ درصد نانوذرات مس در شار حجمی ۰،۲ مترمکعب بر ثانیه نسبت به سیال پایه لازم است [۸]. پیغمبرزاده و همکاران، مبدل خودرو را با نانوذرات Al_2O_3 با سیال پایه آب آزمایش کردند. کسر حجمی در بازه ۰،۱-۱ درصد متغیر بود. بیشترین افزایش انتقال گرما بالغ بر ۴۵٪ با کسر حجمی ۱٪ گزارش شد [۹]. نرگس مقدم و پورنادری انتقال حرارت همرفت آزاد آلومینا-آب در یک محفظه مربعی را بررسی نمودند. عدد ریلی و ناسلت در این تحقیق به دست آمد. نتایج آن‌ها نشان داد ناسلت متوسط نانوسیال با عدد ریلی افزایش می‌یابد [۱۰]. نارکی و همکاران، نتایج تجربی نانوسیال آب و اکسید مس را تحت جریان لایه‌ای در مبدل خودرو گزارش کردند. غلظت حجمی از صفر تا ۰،۴٪ و دمای ورودی از ۵۰ تا ۸۰ درجه سانتی‌گراد متغیر بود. یک افزایش ۸٪ در ضریب کلی انتقال گرما در مقایسه با سیال آب برای کسر حجمی ۰،۴٪ نانوسیال گزارش شد [۱۱]. حسین و همکاران، نانوسیال‌های اکسید تیتانیم و اکسید سیلیسیم با سیال پایه‌ای آب را در مبدل خودرو تحت حالت جریان ورقه‌ای آزمایش کردند. غلظت حجمی و دمای ورودی در بازه ۲-۱٪ و ۸۰-۶۰ درجه سانتی‌گراد متغیر بودند. بیشترین افزایش ۱۱٪ و ۲۲،۵٪ در مقایسه با سیال خالص به ترتیب برای نانوسیال اکسید تیتانیوم و اکسید سیلیسیم به دست آمد [۱۲]. حفیظ^۲ و همکاران، تأثیر استفاده از نانوسیال آب-اکسید روی را بر روی مبدل خودرو بررسی نمودند. بهترین افزایش در انتقال حرارت در این تحقیق، مقدار ۴۶ درصد گزارش گردید. این مقدار افزایش برای درصد حجمی ۰،۲٪ ثبت شد [۱۳]. رحمتی نژاد و همکاران ارزیابی تجربی انتقال حرارت مبدل تراکتور MF 285 با استفاده از نانوسیال $Al_2O_3 + water$ را انجام دادند. نتایج آن‌ها نشان داد افزایش سرعت جریان مایع خنک‌کننده و سرعت جریان هوا می‌تواند عملکرد انتقال گرما را بهبود دهد همچنین ازدیاد کسر حجمی نانوذرات به سیال پایه سبب افزایش نرخ انتقال گرما و کاهش دمای خروجی می‌گردد [۱۴]. ایزدخواه و همکاران به بررسی خصوصیات ترموفیزیکی نانوسیالات بر پایه آب-اتیلن گلیکول با استفاده از روش‌های شبیه‌سازی دینامیک مولکولی غیرتعادلی و دینامیک سیالات محاسباتی پرداختند. نتایج نشان داد افزایش نانوذرات در سیال پایه باعث بهبود هدایت حرارتی نانوسیال و همچنین افزایش چگالی و ویسکوزیته سیال پایه می‌شود. مطالعات نظری انجام‌گرفته در این زمینه حاکی از دقت بالای شبیه‌سازی‌های دینامیک مولکولی است [۱۵].

در این تحقیق تحلیل تجربی اثر استفاده از نانوسیال اکسید آلومینیوم در بهبود انتقال گرمای مبدل خودرو به‌صورت تجربی انجام شد. آزمون‌ها در سه حالت آب خالص؛ آب و اتیلن گلیکول (۴۰:۶۰) و در نهایت با نانوسیال اکسید آلومینیوم با کسرهای حجمی و شارهای مختلف در دو دور کند و تند فن خنک‌کننده انجام شد. با توجه به اینکه وجود نانوسیال در سامانه خنک‌کننده نرخ انتقال گرما را بهبود می‌بخشد می‌توان از مبدل با ابعاد کوچک‌تر استفاده نمود. این موضوع علاوه بر اینکه باعث می‌شود سیال در گردش برای انتقال گرما کمتر شود همچنین پمپ‌های انتقال‌دهنده سیال خنک‌کن نیز می‌توانند کوچک‌تر ساخته شوند در نتیجه انرژی کمتری را مصرف می‌کنند و این موضوع باعث کاهش مصرف سوخت موتور می‌شود. عدم وجود مطالعات مشابه به‌صورت جامع و کامل در این خصوص و ناکارآمدی روابط و مدل‌های آزمایشگاهی ارائه‌شده در تعیین دقیق تأثیر استفاده از نانوسیالات بر مقدار انتقال گرما و از طرفی ارائه نتایج ضدونقیض توسط محققین در این مورد، سبب شد نویسندگان به فکر آزمون تجربی بر روی موتور واقعی بیفتند.

¹ Leong

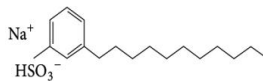
² Hafiz

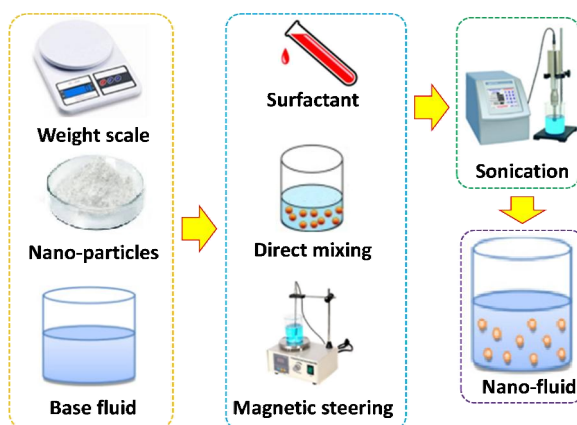
۲- مواد و روش‌ها

۲-۱- تهیه نانوسیال

برای تهیه نانوسیال از روش دو مرحله‌ای استفاده شد. محققان زیادی [۱۶-۱۹] از این روش برای تهیه نانوسیال استفاده کردند. در این روش ابتدا نانوذرات تهیه شده، سپس این مواد در سیال پایه پراکنده می‌شوند. این روش اقتصادی‌ترین روش برای تهیه نانوسیال در مقیاس بزرگ است. اشکال اصلی این روش، تجمع نانوذرات است؛ بنابراین جهت رفع ناپایداری از سورفکتانت استفاده می‌شود (شکل ۴). در این تحقیق برای تهیه نانوسیال از یک هم زن برقی با قابلیت تنظیم دور از ۲۰۰ تا ۳۰۰۰ دور بر دقیقه و سپس از یک تکان‌دهنده مغناطیسی با سرعت ۱۰۰ تا ۲۰۰۰ دور بر دقیقه و قدرت گرمایش ۴۰۰ وات استفاده شد. به‌منظور حفظ پایداری محلول برای اینکه برای کارهای مهندسی مناسب باشد از ۱٪ وزنی مواد فعال‌کننده سطحی (سدیم دودسیل بنزن سولفونات) استفاده شد. مشخصات مواد فعال‌کننده سطحی در جدول ۱ آورده شده است.

جدول ۱ مشخصات ماده سورفکتانت [۲۰]

ماده فعال سطحی	معادله مولکولی	ساختار مولکولی	وزن مولکولی (g. mol ⁻¹)	چگالی (g. cm ⁻³)
سدیم دودسیل بنزن سولفونات	C ₁₈ H ₂₉ NaO ₃ S		۳۴۸,۴۸	۱,۰۲



شکل ۴ مراحل آماده‌سازی نانوسیال

خواص ترموفیزیکی آب؛ اتیلن گلیکول و Al₂O₃ در جدول ۲ نشان داده شده است.

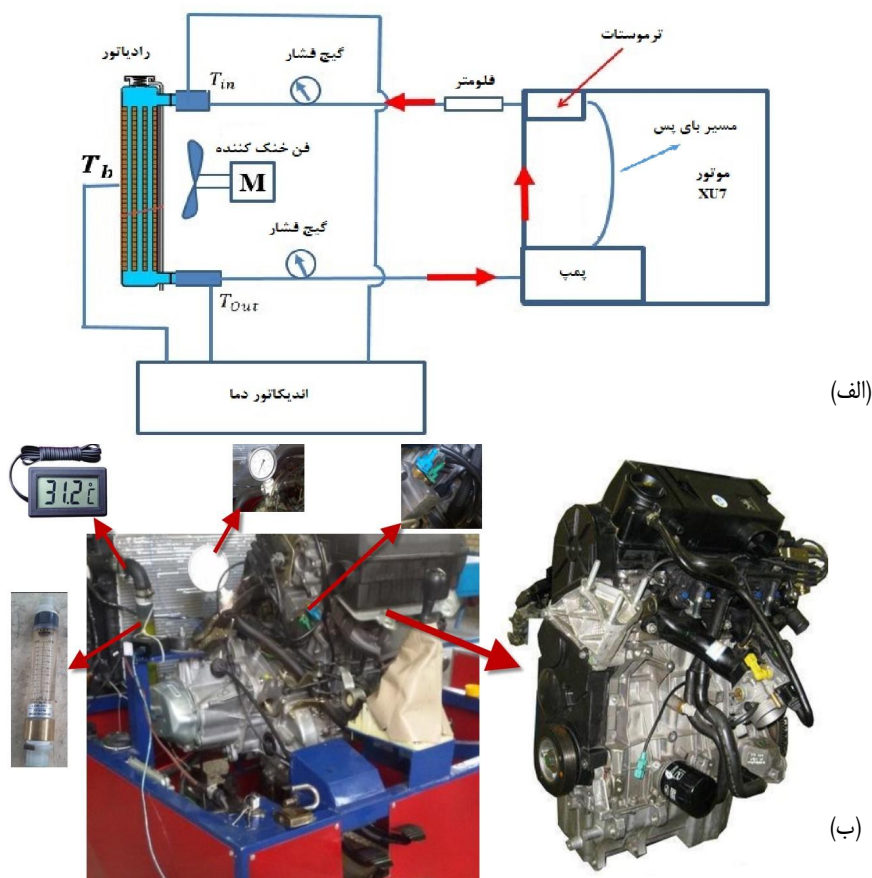
جدول ۲ خواص گرمایی سیال‌های پایه و نانوذره Al₂O₃ [۲۱]

ویژگی	Al ₂ O ₃	اتیلن گلیکول	آب
C _p (Jkg ⁻¹ K ⁻¹)	۷۶۵	۲۴۲۰,۶	۴۱۷۹
ρ (kgm ⁻³)	۳۹۷۰	۱۱۱۰,۲	۹۹۷,۱
K (Wm ⁻¹ K ⁻¹)	۴۰	۰,۲۵۳	۰,۶۱۳
β × 10 ⁻⁵ (K ⁻¹)	۰,۸۵	۵۷	۲۱

برای مشخص نمودن ضریب هدایت حرارتی نانوسیال از KD2-Pro استفاده شد. این دستگاه از روش سیم داغ گذرا به‌منظور اندازه‌گیری ضریب هدایت حرارتی استفاده می‌کند. به‌منظور بررسی انتقال گرما انجام شده در مبدل موتور XU7 از معادلات ارائه‌شده در مرجع [۳] استفاده شد.

۲-۲- معرفی موتور و سامانه خنک کاری XU7

موتور XU7 مورد استفاده در این تحقیق بر روی خودروی سمند قرار داشته که دارای حجم ۱۷۶۱CC است. این موتور چهار استوانه دارای نسبت تراکم ۹،۲۵:۱ بوده و قدرت ۹۷ اسب بخار در دور ۶۰۰۰ دور بر دقیقه با بیشترین گشتاور ۱۴۸ نیوتن متر در دور ۳۵۰۰ دور بر دقیقه تولید می کند. بنزین مناسب این موتور اکتان ۹۵ بوده و سامانه سوخت افشانه ای این موتور از نوع پاشش چند نقطه ای^۱ است. همچنین استاندارد حد آلاینده گی آن اروپا ۲ است. حجم آب و مایع خنک کننده این موتور ۶،۶ لیتر می باشد. فشار کارکرد سامانه خنک کاری ۱،۴ بار است. برای خنک کاری مبدل از دو عدد فن استفاده شده است که دمای شروع به کار فن در مرحله اول و دوم به ترتیب ۹۴ و ۱۰۲ درجه سانتی گراد است. در این تحقیق برای راه اندازی فن در دور تند و کند، از یک کلید استفاده شد. از دو عدد دماسنج نوع T برای سنجش دمای ورودی و خروجی به مبدل و از یک عدد دیگر برای سنجش دمای بدنه مبدل استفاده شد. با توجه به هدایت حرارتی بالای آلومینیوم و ضخامت کم لوله ها می توان دمای بیرون و داخل لوله ها را یکسان فرض نمود. تنظیم دماسنج ها انجام شد و دقت اندازه گیری: $\pm 1^{\circ}\text{C}$ (0 to 150⁰C) برآورد گردید. مبدل مورد استفاده در این موتور از جنس آلومینیوم بوده و جریان سیال در داخل آن افقی از سمت راست به چپ است. برای اندازه گیری افت فشار سیال درون مبدل، از دو عدد فشارسنج (psi) ۰-۶۰ با دقت (psi) ۰،۲۵ استفاده شد. از روتامتر شیشه ای نوع LZT - 2520G با محدوده اندازه گیری 2 - 20 GPM (7.566 - 75.66 LPM) و دقت اندازه گیری ± 4 درصد جهت اندازه گیری شار سیال استفاده شد. برای خواندن اطلاعات دقیق دور موتور در هر لحظه از دستگاه عیب یاب خودروی مهفاد صنعت استفاده شد. طرح سامانه پیاده سازی شده بر روی موتور XU7 در شکل ۵ نشان داده شده است.



شکل ۵ الف) طرح سامانه پیاده سازی شده، ب) تجهیزات نصب شده بر روی موتور XU7

بعد از نصب و کنترل تجهیزات آزمایشگاهی؛ سامانه خنک کاری موتور را در حالت‌های آب خالص؛ مخلوط آب و اتیلن گلیکول (۶۰:۴۰) و در نهایت ترکیب‌های مختلف نانوسیال آزمون شد. موتور را روشن نموده و اجازه می‌دهیم دمای آن در حد عادی (باز شدن ترموستات) بالا رود. در سه شار مختلف آزمون‌ها انجام شد. برای دور آرام موتور (۸۵۰ دور بر دقیقه) و دورهای ۱۳۶۰ و ۲۰۰۰ دور بر دقیقه به ترتیب شار ۱۰، ۲۱ و ۳۲ لیتر بر دقیقه محاسبه شد.

۳- نتایج و بحث

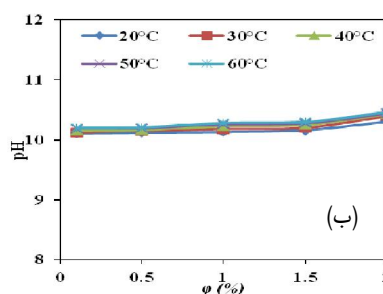
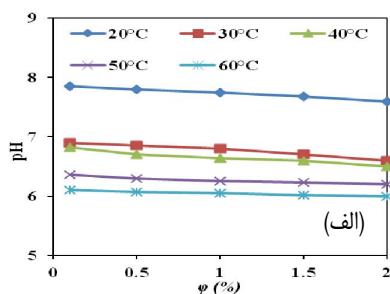
خواص ترموفیزیکی و عملکرد حرارتی نانوذرات Al_2O_3 در سیال پایه آب و اتیلن گلیکول قبلاً بررسی و در منبع [۲۲] گزارش شده است.

۳-۱- بررسی نه‌نشینی نانوذرات در سیال پایه

یکی از مهم‌ترین روش‌های یافتن کیفیت پایداری نانوسیال از طریق بررسی رفتار حرکتی ذرات در یک محلول کلئیدی بر اثر جریان برق است. بر اساس یک نظریه پایداری، اگر ظرفیت زتا دارای مقدار مطلق بالایی باشد، دافعه الکترواستاتی بین ذرات افزایش می‌یابد که این منجر به پایداری خوب مخلوط ناهمگن^۱ می‌شود. ذراتی که بار سطحی بالایی دارند تمایلی به تشکیل خوشه ندارند. محققان بسیاری از جمله وو^۲ و همکاران [۲۳] گزارش کرده‌اند که در ظرفیت زتای بیشتر از 30 mv محلول کلئیدی پایدارند. دستگاه تحلیلگر ظرفیت زتا الگوی ZETA - Check ساخت شرکت Particle Metrix کشور آلمان برای اندازه‌گیری ظرفیت زتا استفاده شد. بدین منظور از 2 wt% نانوذرات Al_2O_3 با قطر ۲۰ نانومتر استفاده شد. در این آزمایش دما ۲۵ درجه سانتی‌گراد، فشار یک اتمسفر و رطوبت ۳۸ درصد بود. بالاترین مقدار اندازه‌گیری شده برای نانوسیال اکسید آلومینیوم به مقدار ۳۷,۷ میکروولت بود که نشان از پایداری و پراکندگی عالی است.

۳-۲- تغییرات pH در دماهای مختلف

pH معیاری از مقدار اسیدی یا بازی بودن آب است. دامنه‌ی pH از ۰ تا ۱۴ متغیر است. pH را می‌توان معرف غلظت یون H^+ در آب ارزیابی نمود. در حالت تعادل H^+ و OH^- با هم برابر است به همین دلیل در دمای ۲۵ درجه سانتی‌گراد برای آب خالص pH=7 است. افزایش دما سبب تفکیک یونی آب شده و حرکت بیشتر در مولکول‌ها باعث ایجاد یون H^+ بیشتر شده و رفتار اسیدی در ماده بیشتر می‌شود و با افزایش دما شاهد کاهش pH خواهیم بود [۲۴]. شکل ۶ تغییرات pH را در دماهای مختلف برای نانوسیال اکسید آلومینیوم در حالت خالص و در حالتی که از سولفونات SDBS استفاده شده است نشان می‌دهد. سولفونات SDBS یک محلول آنیونی است که باعث می‌شود $pH > 10$ را داشته باشیم.



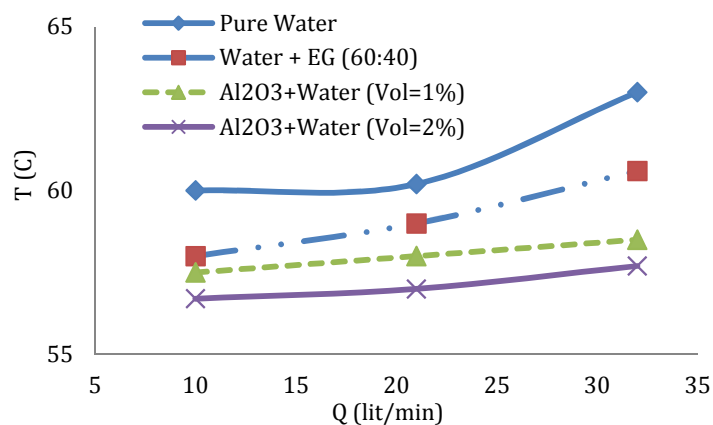
شکل ۶ تغییرات pH در دماهای مختلف برای نانوسیال (الف) اکسید آلومینیوم، (ب) اکسید آلومینیوم به همراه سولفونات SDBS

¹ Suspension

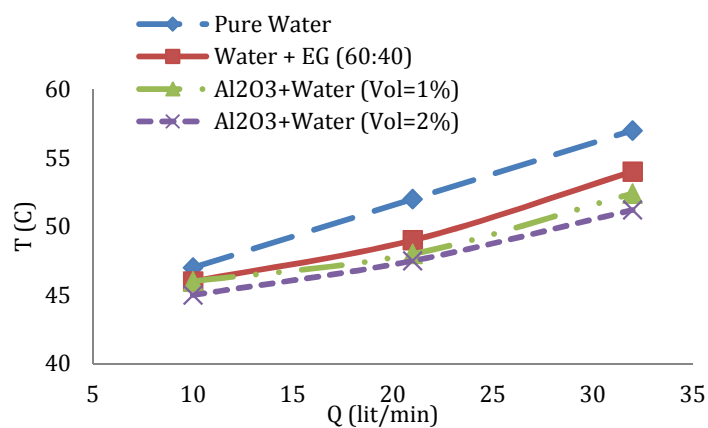
² Wu

۳-۳- تغییرات دما ورودی؛ خروجی و دمای بدنه مبدل

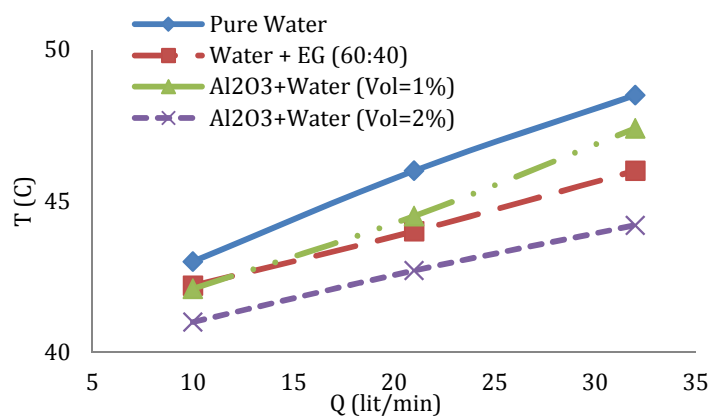
در شکل ۷ نمودار تغییرات دمای ورودی؛ خروجی و دمای بدنه مبدل برای دبی‌ها و درصدهای حجمی مختلف نانوسیال در دور تند فن خنک‌کننده آورده شده است.



(الف)



(ب)



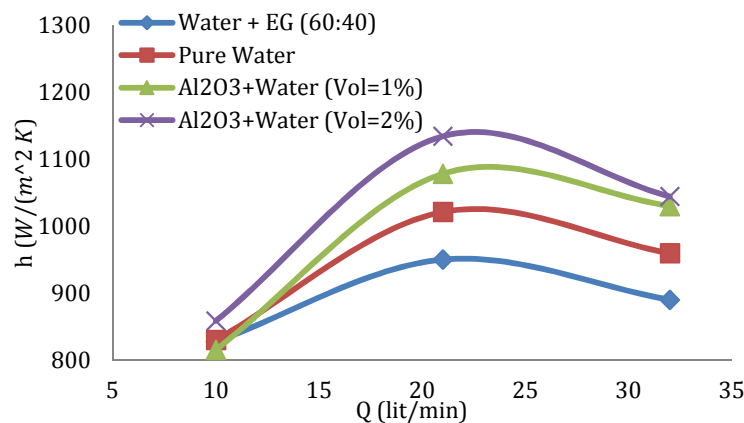
(ج)

شکل ۷ الف) دمای ورودی، ب) دمای خروجی، ج) دمای دیواره مبدل در حالت دور تند فن

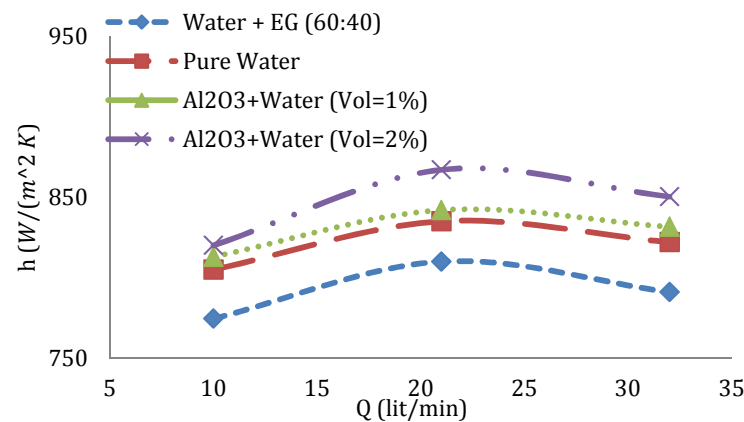
به طور مثال برای آب خالص در شار ۱۰ لیتر بر دقیقه با اندازه گیری دمای ورودی و خروجی مبدل در دور تند فن شاهد انتقال گرما ۲۸٪ هستیم که این مقدار برای شار ۳۰ لیتر بر دقیقه مقدار ۱۹٪ است. این موضوع به خاطر افزایش سرعت حرکت سیال و زمان کم انتقال گرما است.

۳-۴- تأثیر تغییر کسر حجمی نانوذرات بر روی ضریب انتقال حرارت همرفتی

ضریب انتقال حرارت همرفتی در شارهای مختلف برای آب خالص؛ مخلوط آب و اتیلن گلیکول (۶۰:۴۰) و در نهایت ترکیب های ۱ و ۲ درصد حجمی از نانوسیال در دوره های کند و تند فن آزمون شد و در شکل ۸ گزارش گردید.



(الف)



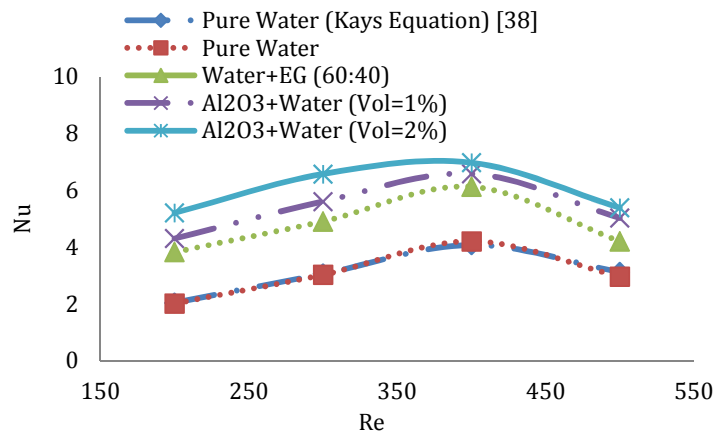
(ب)

شکل ۸ نمودار تغییرات ضریب انتقال حرارت همرفتی بر حسب شار (الف) در دور تند فن، (ب) در دور کند فن

هر چند با افزایش شار انتقال گرما زیاد می شود ولی بالا بردن شار، مستلزم بالا بردن دور موتور است که این امر موجب افزایش مقدار حرارت موتور و افزایش دمای بالک می گردد؛ بنابراین افزایش بیشتر دور موتور باعث کم شدن ضریب انتقال حرارت همرفتی می شود. اضافه نمودن نانوذرات به سیال پایه سبب افزایش ضریب انتقال حرارت همرفتی می شود مثلاً اضافه نمودن ۲ درصد کسر حجمی نانوذرات به سیال پایه در دور تند فن به ترتیب برای شارهای ۱۰، ۲۱ و ۳۲ لیتر بر دقیقه، افزایش تقریبی ۳٪، ۲۰٪ و ۱۶٪ ضریب انتقال حرارت همرفتی نسبت به سیال پایه را سبب می شود.

۳-۵- تغییرات عدد ناسلت

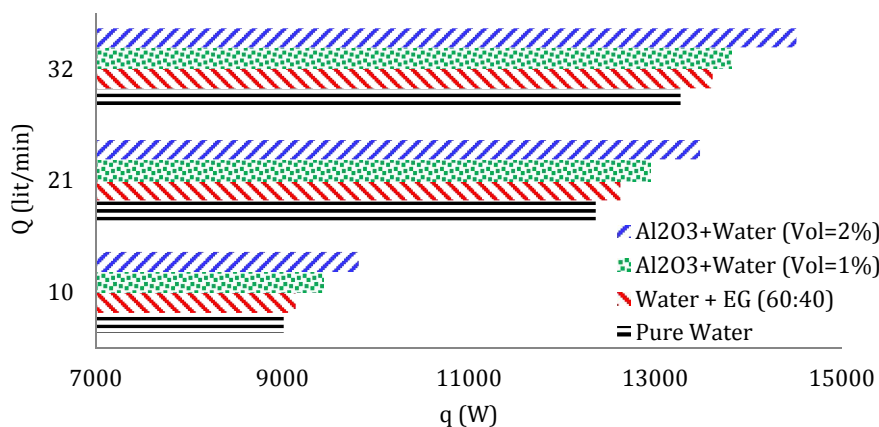
تغییرات عدد ناسلت نسبت به عدد رینولدز در دور تند فن برای سه حالت آب خالص؛ آب و اتیلن گلیکول (۶۰:۴۰) و در نهایت با نانوسیال اکسید آلومینیوم با کسرهای حجمی ۱ و ۲ درصد محاسبه و در شکل ۹ گزارش گردید. عدد ناسلت با افزایش رینولدز افزایش پیدا کرده و در رینولدز ۴۰۰ به مقدار حداکثر خود می‌رسد و سپس کاهش پیدا می‌کند. این مورد به خاطر کاهش ضریب انتقال حرارت همرفتی در شارهای بالا است. همچنین افزایش نانوذرات به سیال پایه سبب افزایش عدد ناسلت می‌گردد.



شکل ۹ نمودار تغییرات ناسلت بر حسب رینولدز

۳-۶- انتقال گرما

مقدار انتقال گرما در شارهای مختلف برای سه حالت آب خالص؛ آب و اتیلن گلیکول (۶۰:۴۰) و در نهایت با نانوسیال اکسید آلومینیوم (Al₂O₃) با کسرهای حجمی ۱ و ۲ درصد در دور تند فن محاسبه و در شکل ۱۰ گزارش گردید.

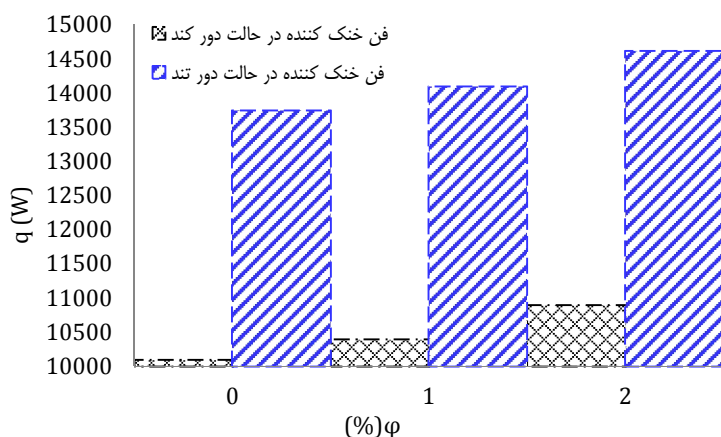


شکل ۱۰ تغییرات انتقال حرارت بر حسب شارهای مختلف

در شارهای کم با کوچک بودن عدد رینولدز مقدار انتقال گرما برای نانوسیال مورد استفاده در این تحقیق نسبت به سیال پایه چندان افزایشی ندارد اما با افزایش شار سیال، این مقدار افزایش می‌یابد. مقدار انتقال حرارت در شار ۱۰ لیتر بر دقیقه برای نانوسیال با درصد حجمی ۱ و ۲ درصد به ترتیب ۴٫۶ و ۸٫۹ درصد؛ در شار ۲۱ لیتر بر دقیقه به ترتیب به مقدار ۴٫۷ و ۹ درصد و در شار ۳۰ لیتر بر دقیقه به ترتیب به مقدار ۱٫۴ و ۹٫۳ درصد نسبت به سیال پایه افزایش داشت. پس می‌توان نتیجه گرفت با ازدیاد کسر حجمی نانوذرات و شار نانوسیال مقدار انتقال گرما افزایش می‌یابد.

۳-۷- مقایسه انتقال گرمای مبدل در دور کند و دور تند فن خنک کننده

در شکل ۱۱ نمودار تغییرات انتقال گرما در دور کند و تند فن خنک کننده بر اساس کسر حجمی نانوذرات نشان داده شده است. انتقال حرارت به ترتیب برای کسرهای حجمی ۱ و ۲ درصد به ترتیب افزایش ۳۴٫۲٪ و ۳۵٪ را نشان می‌دهد.



شکل ۱۱ تغییرات انتقال گرما بر حسب کسر حجمی برای دور کند و تند فن خنک کننده

۳-۸- متغیر مریت و افت فشار در مبدل

برای اندازه‌گیری افت فشار سیال درون مبدل، از دو عدد فشارسنج در ورودی و خروجی مبدل استفاده شد. با توجه به آزمایش‌های انجام شده مشخص گردید بهترین حالت برای اندازه‌گیری افت فشار و متغیر مریت در شار ۳۲ لیتر بر دقیقه و در حالت دور کند فن خنک کننده است. افت فشار ایجاد شده در مبدل با کسر حجمی ۱٪ و ۲٪ نسبت به سیال پایه در شار ثابت ۳۰ لیتر بر دقیقه به ترتیب ۲۲٪ و ۴۰٫۸٪ محاسبه شد. تغییرات متغیر مریت در همان شار به ترتیب برای کسرهای حجمی ۱٪ و ۲٪ کاهش ۱۹٪ و ۲۷٪ را نسبت به سیال پایه نشان می‌دهد. مقادیر به دست آمد با منبع [۲۵] ارزیابی گردید.

۴- نتیجه‌گیری

در مطالعه حاضر تحلیل تجربی اثر استفاده از نانوسیال اکسید آلومینیوم در بهبود انتقال گرمای مبدل خودرو، در شرایط واقعی بر روی موتور XU7 انجام شد. آزمون‌ها در سه حالت آب خالص؛ آب و اتیلن گلیکول (۶۰:۴۰) و در نهایت با نانوسیال اکسید آلومینیوم با کسرهای حجمی ۱ و ۲ درصد و شارهای ۱۰، ۲۱ و ۳۲ لیتر بر دقیقه، در دو دور کند و تند فن خنک کننده انجام گرفت. نتایج نشان داد با اضافه نمودن افزودنی سطحی SDBS به Al_2O_3 نانوسیال تهیه شده در ۲۲ روز اول پایدار بود. همچنین مقدار ظرفیت زتا ۳۷٫۷ میکروولت برآورد شد که نشان از پایداری نانوسیال است. با افزایش شار ضریب انتقال حرارت تا شار ۲۱ لیتر بر دقیقه افزایش یافته و بعدازآن به علت بالا رفتن دور موتور است دمای بالک افزایش یافته و باعث کم شدن ضریب انتقال حرارت همرفتی می‌شود.

افزایش نانوذرات به سیال پایه باعث افزایش ضریب انتقال حرارت همرفتی می‌شود مثلاً با افزودن ۲٪ حجمی نانوذرات به سیال پایه در دور تند فن به ترتیب برای شارهای ۱۰، ۲۱ و ۳۲ لیتر بر دقیقه شاهد افزایش تقریبی ۳٪، ۲۰٪ و ۱۶٪ ضریب انتقال حرارت همرفتی نسبت به سیال پایه هستیم. عدد ناسلت با افزایش رینولدز افزایش پیدا کرده و در رینولدز ۴۰۰ به مقدار حداکثر آن می‌رسد و سپس دوباره کاهش پیدا می‌کند. این امر به خاطر کم شدن ضریب انتقال حرارت همرفتی در شارهای بالا است.

در شارهای پایین با کوچک بودن رینولدز مقدار انتقال حرارت برای نانوسیال نسبت به سیال پایه چندان افزایشی ندارد اما با افزایش شار سیال، انرژی جنبشی نانوذرات زیاد شده و انتقال حرارت توسط آن‌ها افزایش می‌یابد. با تبدیل شدن دور کند؛ به دور تند در فن خنک‌کننده، برای کسرهای حجمی ۱ و ۲ درصد به ترتیب شاهد افزایش ۳۴٫۲٪ و ۳۵٪ هستیم. افت فشار مبدل با کسر حجمی ۱٪ و ۲٪ نسبت به سیال پایه در شار ثابت ۳۰ لیتر بر دقیقه به ترتیب ۲۲٪ و ۴۰٫۸٪ محاسبه شد.

References

- [1] Giwa SO, Adegoke KA, Sharifpur M, Meyer JP. Research trends in nanofluid and its applications: A bibliometric analysis. *Journal of Nanoparticle Research*. 2022 Mar;24(3):63. doi: [10.1007/s11051-022-05453-z](https://doi.org/10.1007/s11051-022-05453-z)
- [2] Saripella SK, Yu W, Routbort JL, France DM. Effects of nanofluid coolant in a class 8 truck engine. *SAE Technical Paper*; 2007 Nov 1. doi: [10.4271/2007-01-2141](https://doi.org/10.4271/2007-01-2141)
- [3] Rahmatinejad B, Rahimi Asiabaraki H, Azimpour Shishevan F. Investigation of the effect of AL2O3 nanofluid in M13NI engine cooling system. *Engine Research*. 2023 Mar 21;70(1):47-65. doi: [10.22034/ER.2023.1975318.0](https://doi.org/10.22034/ER.2023.1975318.0) [In Persian]
- [4] Kiani H, Ahmadi Nadooshan A. Thermal performance enhancement of automobile radiator using water-CuO nanofluid: an experimental study. *Energy Equipment and Systems*. 2019 Sep 1;7(3):235-48. doi: [10.22059/EES.2019.36560](https://doi.org/10.22059/EES.2019.36560)
- [5] Hajabdollahi H, Ghamari V. Experimental study on the use of aluminum oxide and copper oxide nanoparticles to improve the thermal hydraulic performance of Peugeot 206 radiator. *Journal of Modeling in Engineering*. 2022 Mar 21;20(68):101-12. doi: [10.22075/jme.2021.22874.2063](https://doi.org/10.22075/jme.2021.22874.2063) [In Persian]
- [6] Vajjha RS, Das DK, Namburu PK. Numerical study of fluid dynamic and heat transfer performance of Al2O3 and CuO nanofluids in the flat tubes of a radiator. *International Journal of Heat and fluid flow*. 2010 Aug 1;31(4):613-21. doi: [10.1016/j.ijheatfluidflow.2010.02.016](https://doi.org/10.1016/j.ijheatfluidflow.2010.02.016)
- [7] Xie H, Li Y, Yu W. Intriguingly high convective heat transfer enhancement of nanofluid coolants in laminar flows. *Physics Letters A*. 2010 May 31;374(25):2566-8. doi: [10.1016/j.physleta.2010.04.026](https://doi.org/10.1016/j.physleta.2010.04.026)
- [8] Leong KY, Saidur R, Kazi SN, Mamun AH. Performance investigation of an automotive car radiator operated with nanofluid-based coolants (nanofluid as a coolant in a radiator). *Applied Thermal Engineering*. 2010 Dec 1;30(17-18):2685-92. doi: [10.1016/j.applthermaleng.2010.07.019](https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2010.07.019)
- [9] Peyghambarzadeh SM, Hashemabadi SH, Hoseini SM, Jamnani MS. Experimental study of heat transfer enhancement using water/ethylene glycol based nanofluids as a new coolant for car radiators. *International communications in heat and mass transfer*. 2011 Nov 1;38(9):1283-90. doi: [10.1016/j.icheatmasstransfer.2011.07.001](https://doi.org/10.1016/j.icheatmasstransfer.2011.07.001)
- [10] Narges-Moghadam F, Pournaderi P. Free convection heat transfer of alumina-water nanofluid in an enclosure: assessment of viscosity and conductivity models. *International Journal of Engineering and Applied Physics*. 2022 Jan 24;2(1):363-80.
- [11] Naraki M, Peyghambarzadeh SM, Hashemabadi SH, Vermahmoudi Y. Parametric study of overall heat transfer coefficient of CuO/water nanofluids in a car radiator. *International Journal of Thermal Sciences*. 2013 Apr 1;66:82-90. doi: [10.1016/j.ijthermalsci.2012.11.013](https://doi.org/10.1016/j.ijthermalsci.2012.11.013)
- [12] Hussein AM, Bakar RA, Kadrigama K, Sharma KV. Heat transfer enhancement using nanofluids in an automotive cooling system. *International Communications in Heat and Mass Transfer*. 2014 Apr 1;53:195-202. doi: [10.1016/j.icheatmasstransfer.2014.01.003](https://doi.org/10.1016/j.icheatmasstransfer.2014.01.003)
- [13] Ali HM, Ali H, Liaquat H, Maqsood HTB, Nadir MA. Experimental investigation of convective heat transfer augmentation for car radiator using ZnO–water nanofluids. *Energy*. 2015 May 1;84:317-24. doi: [10.1016/j.energy.2015.02.103](https://doi.org/10.1016/j.energy.2015.02.103)
- [14] Rahmatinejad B, Abbasgholipour M, Mohammadi Alasti B. Experimental Evaluation of Heat Transfer of MF 285 Tractor Radiator, using Nano-fluid AL2O3+ Water. *Journal of Agricultural Machinery*. 2022 Sep 23;12(3):281-99. doi: [10.22067/jam.2020.58870.0](https://doi.org/10.22067/jam.2020.58870.0) [In Persian]
- [15] Izadkhah MS, Erfan-Niya H, Moradkhani H. A study on the thermophysical properties of water/ethylene glycol based nanofluids using non-equilibrium molecular dynamics and computational fluid dynamics methods. *Modares Mechanical Engineering*. 2016 Sep 10;16(7):153-62. [In Persian]

- [16] Zhu D, Li X, Wang N, Wang X, Gao J, Li H. Dispersion behavior and thermal conductivity characteristics of Al₂O₃-H₂O nanofluids. *Current Applied Physics*. 2009 Jan 1;9(1):131-9. doi: [10.1016/j.cap.2007.12.008](https://doi.org/10.1016/j.cap.2007.12.008)
- [17] Suresh S, Venkitaraj KP, Selvakumar P, Chandrasekar M. Synthesis of Al₂O₃-Cu/water hybrid nanofluids using two step method and its thermo physical properties. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*. 2011 Sep 5;388(1-3):41-8. doi: [10.1016/j.colsurfa.2011.08.005](https://doi.org/10.1016/j.colsurfa.2011.08.005)
- [18] Septiadi WN, Trisnadewi IANT, Putra N, Setyawan I. Synthesis of hybrid nanofluid with two-step method. *InE3S Web of Conferences 2018 (Vol. 67, p. 03057)*. EDP Sciences. doi: [10.1051/e3sconf/20186703057](https://doi.org/10.1051/e3sconf/20186703057)
- [19] Drzazga M, Lemanowicz M, Dzido G, Gierczycki A. Preparation of metal oxide-water nanofluids by the two-step method. *Inżynieria i Aparatura Chemiczna*. 2012(5):213-5.
- [20] Rahmatinejad B. Investigating Thermophysical Properties and Thermal Performance of Al₂O₃ Nanoparticles in Water and Ethylene Glycol Based Fluids. *Journal of Nanostructures*. 2022 Jul 1;12(3):642-59. doi: [10.22052/JNS.2022.03.018](https://doi.org/10.22052/JNS.2022.03.018)
- [21] Wen D, Lin G, Vafaei S, Zhang K. Review of nanofluids for heat transfer applications. *Particuology*. 2009 Apr 1;7(2):141-50. doi: [10.1016/j.partic.2009.01.007](https://doi.org/10.1016/j.partic.2009.01.007)
- [22] Rahmatinejad B, Abbasgholipour M, Mohammadi Alasti B. Investigating thermo-physical properties and thermal performance of Al₂O₃ and CuO nanoparticles in Water and Ethylene Glycol based fluids. *International Journal of Nano Dimension*. 2021 Jul 1;12(3):252-71. doi: [10.22034/IJND.2021.681560](https://doi.org/10.22034/IJND.2021.681560)
- [23] Wu S, Zhu D, Li X, Li H, Lei J. Thermal energy storage behavior of Al₂O₃-H₂O nanofluids. *Thermochimica Acta*. 2009 Feb 10;483(1-2):73-7. doi: [10.1016/j.tca.2008.11.006](https://doi.org/10.1016/j.tca.2008.11.006)
- [24] Choudhary R, Khurana D, Kumar A, Subudhi S. Stability analysis of Al₂O₃/water nanofluids. *Journal of Experimental Nanoscience*. 2017 Jan 1;12(1):140-51. doi: [10.1080/17458080.2017.1285445](https://doi.org/10.1080/17458080.2017.1285445)
- [25] Rahmatinejad B, Azimpour Shishevan F. Experimental and numerical evaluation of heat transfer of Perkins A4.248 engine radiator using CuO+water nanofluid. *Journal of mechanical engineering of Tabriz University*. 2023 Jan 21;52(4):105-14. doi: [10.22034/JMEUT.2022.51856.3113](https://doi.org/10.22034/JMEUT.2022.51856.3113) [In Persian]